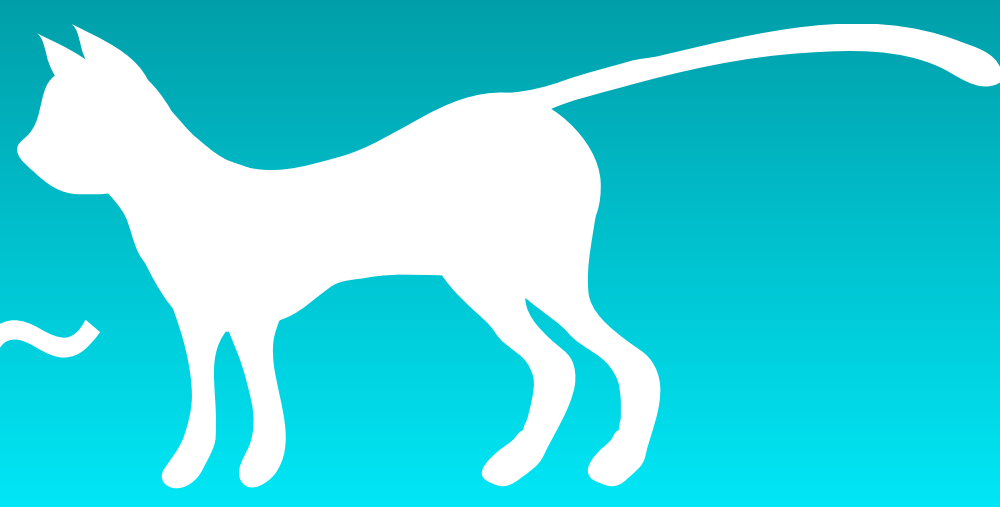


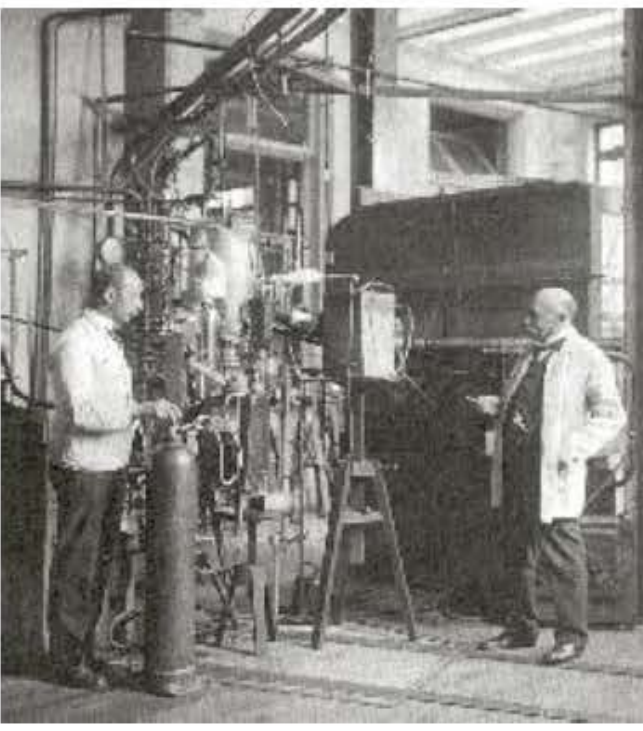
NII 超伝導量子コンピュータ ～超伝導人工原子で量子計算機をつくる～

Superconducting Quantum Computer



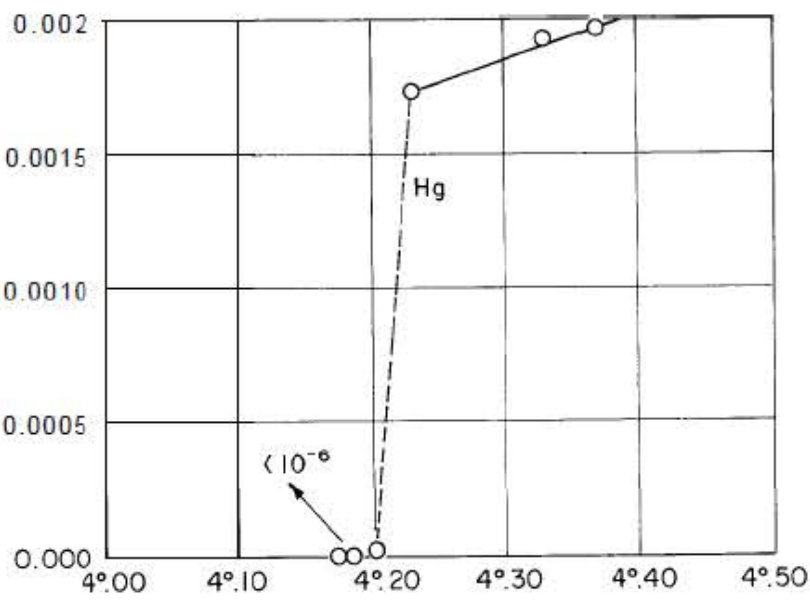


Universiteit Leiden



In 1908, Onnes succeeded in liquefying helium

Famous for: Reaching the nearest to absolute zero by bringing the temperature of helium down to 0.9° K ,



In 1911, He found Superconductivity in Hg.

H. K. Onnes, Commun. Phys. Lab.12,120, (1911)

He also found Superconductivity in Pb, Sn.



Heike Kamerlingh Onnes 1853 - 1926

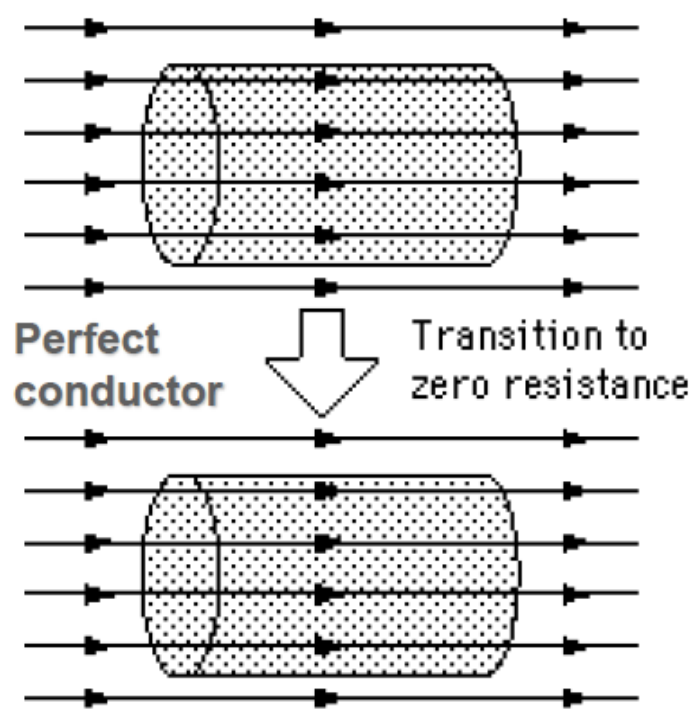


The Nobel Prize in Physics 1913

"for his investigations on the properties of matter at low temperatures which led, inter alia, to the production of liquid helium"

マイスナー効果の発見 (1933)

In the case of perfect conductor, magnetic flux tend to stay unchanged under the transition



Perfect conductor Transition to zero resistance

Superconductor Transition to zero resistance

Meißner-Ochsenfeld effect

Critical magnetic field : $\frac{H_c^2(T)}{8\pi} = f_n(T) - f_s(T)$



magnet
superconductor



Walther Meißner (16.12.1882-16.11.1974)

Ginzburg-Landau 理論 (1950)

Extension of Landau's theory of 2nd order phase transition to **complex order parameter**

$$f = f_n + \alpha |\psi|^2 + \frac{\beta}{2} |\psi|^4 + \frac{1}{2m^*} \left| \left(\hbar \nabla - \frac{e^*}{c} A \right) \psi \right|^2 + \frac{|H|^2}{8\pi}$$

: Feat of insight

Phenomenological theory of macroscopic order parameter (Ψ), though it cannot explain what is Ψ .

It is useful in the real experimental conditions where Ψ is spacially Inhomogeneous.

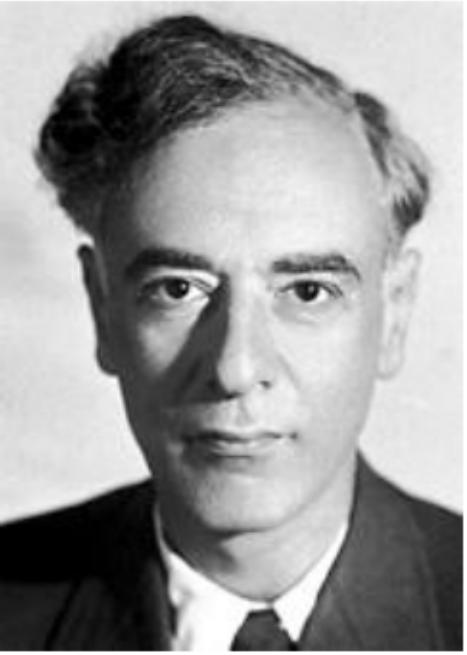
The idea of 'complex order parameter' captured the essence of superconductivity !



Vitaly L. Ginzburg (1916 - 2009)



The Nobel Prize in Physics 2003



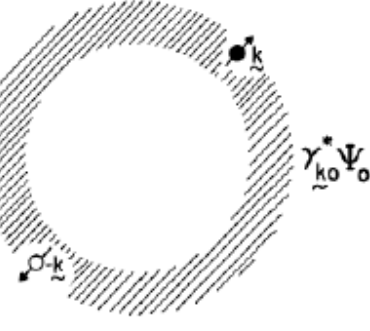
Lev Davidovich Landau (1908 - 1968)



The Nobel Prize in Physics 1962

"for pioneering contributions to the theory of superconductors and superfluids"

"for his pioneering theories for condensed matter, especially liquid helium"



Instability of Fermi sea against infinitesimal attractive interaction

L. N. Cooper, Phys. Rev. 104, 1189 (1956).

Condensation of Cooper pairs into the BCS ground state

J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. 108, 1175 (1957).

$$\left| \Psi_{BCS} \right\rangle = \prod_k \left(|u_k\rangle + |v_k\rangle e^{i\varphi} c_{k\uparrow}^* c_{-k\downarrow}^* \right) \left| \Psi_{vac} \right\rangle$$


The Nobel Prize in Physics 1972

"for their jointly developed theory of superconductivity, usually called the BCS-theory"

The first microscopic theory of superconductivity attractive interaction by virtual phonon exchange

液体窒素温度でマイスナー効果を体験しよう

- 超伝導状態：金属中の電子の相転移（相転移の例：磁石を温めると磁力が消失）
- 超伝導の本質は抵抗ゼロでなく、マイスナー効果：内部の磁場を排除しようとする。
- 超伝導体中の大多数の電子対は、エネルギー的に最も安定な同一の状態を取る。

超伝導状態を使えば、金属中の夥しい数の電子がたった1つの同一の状態に押し込められる。「巨視的量子効果」と呼ばれるこの現象は、レーザー(光)、超流動(原子)、超伝導(電子)、ボース・アインシュタイン凝縮(光、ボラリトン、原子)で生じている現象と物理的起源は同じ。この現象を利用すれば、原子や分子の中で起きていた非日常的な「量子の世界」を、ピンセットでつまめるような日常的なスケールに拡大して、起こすことが可能。いわば、大きな人工原子状態を作ることができる。

ジョセフソン効果の発見 (1962)

Inspired by P. W. Anderson's concept of 'broken symmetry' in superconductors, Josephson predicted the **tunneling supercurrent as a function of the phase difference ($\Delta\varphi$) of the order parameters.**

B. D. Josephson, Phys. Lett. 1, 251 (1962).

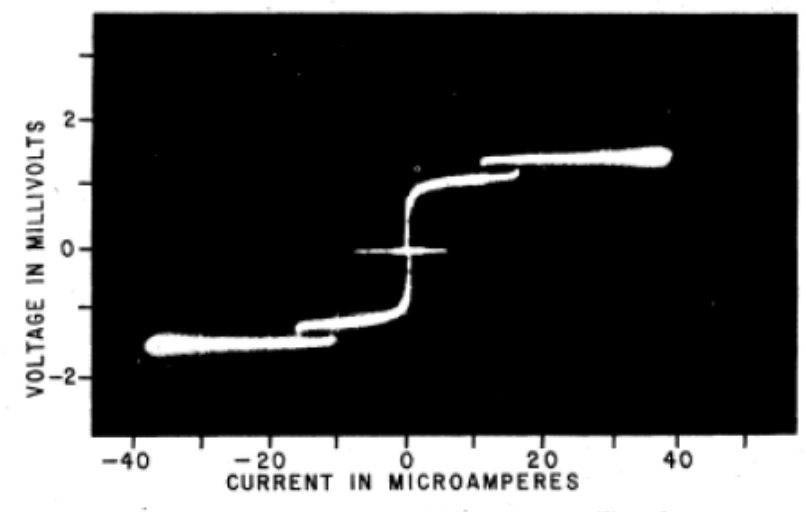


FIG. 3 The first published observation of tunnelling between two evaporated-film superconductors (Smith et al., 1961). A zero-voltage supercurrent is clearly visible. It was not until the experiments of Anderson and Rowell (1963) that such supercurrents could be definitely ascribed to the tunnelling process.

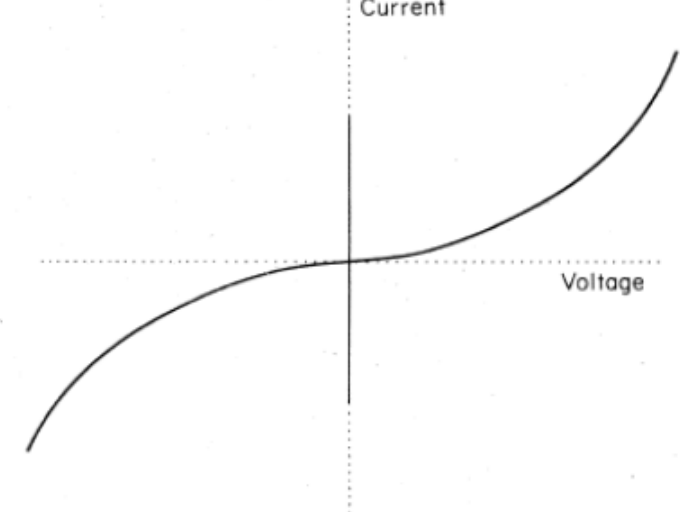


FIG. 2. Predicted two-part current-voltage characteristic of a superconducting tunnel junction.



Brian David Josephson 1940 -

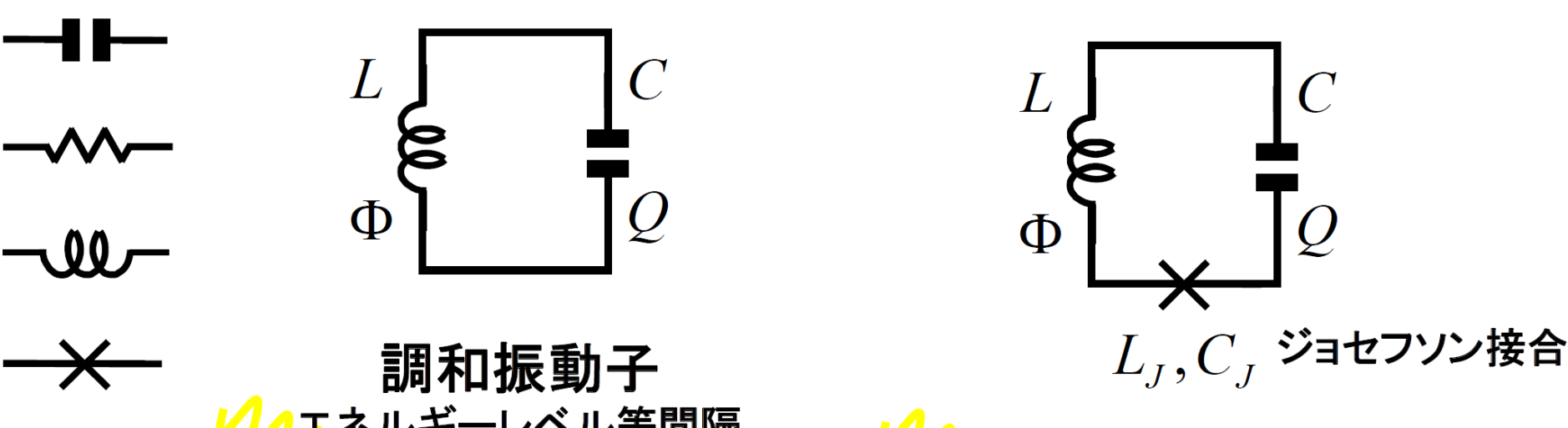


The Nobel Prize in Physics 1973

"for his theoretical predictions of the properties of a supercurrent through a tunnel barrier, in particular those phenomena which are generally known as the Josephson effects"

ジョセフソン接合を含む LC回路 で 量子ビット を準備する

量子 LC 回路 ($\hbar v > k_B T$) 非調和的 LC 回路



調和振動子 エネルギーレベル等間隔 L, C, Φ L_J, C_J ジョセフソン接合 量子二準位 qubit

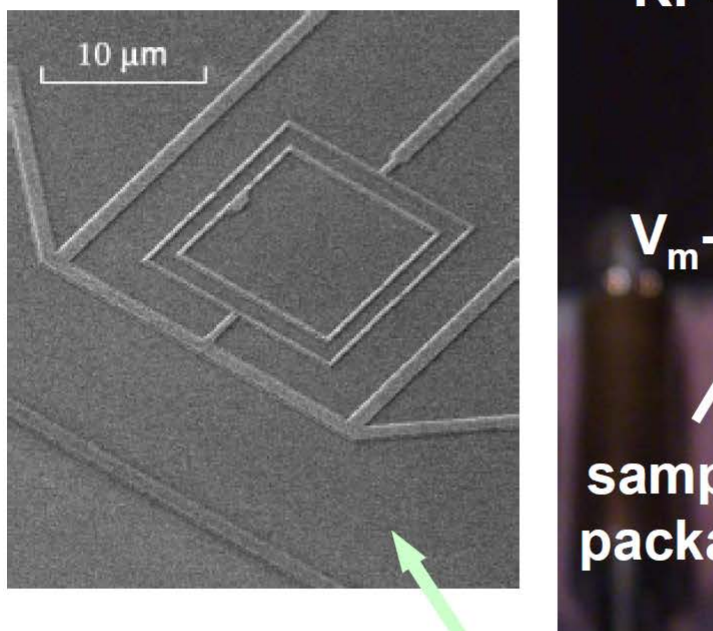
$$H = \frac{p^2}{2m} + \frac{kx^2}{2} \quad H = \frac{\Phi^2}{2L} + \frac{Q^2}{2C}$$

$[X, P] = i\hbar \quad \leftrightarrow \quad [Q, \Phi] = i\hbar$

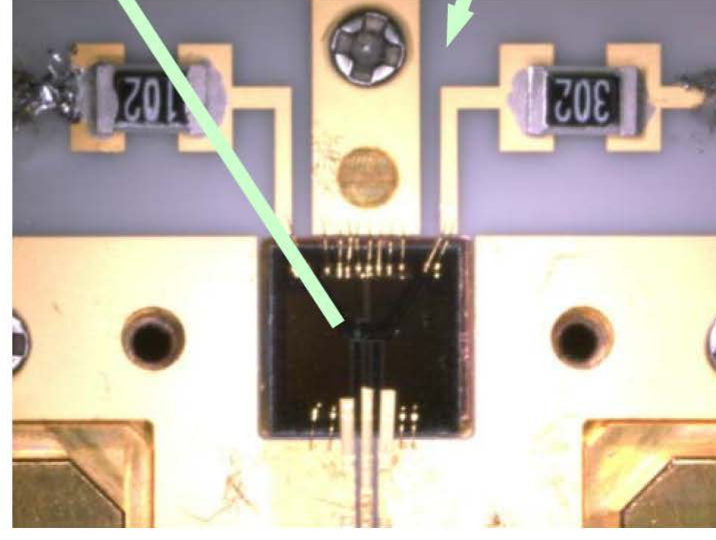
非調和性により、上準位から分離「最低二準位」= 量子ビット



Dilution Fridge (~ 20 mK)



RF-line V_m-line bias-line sample package



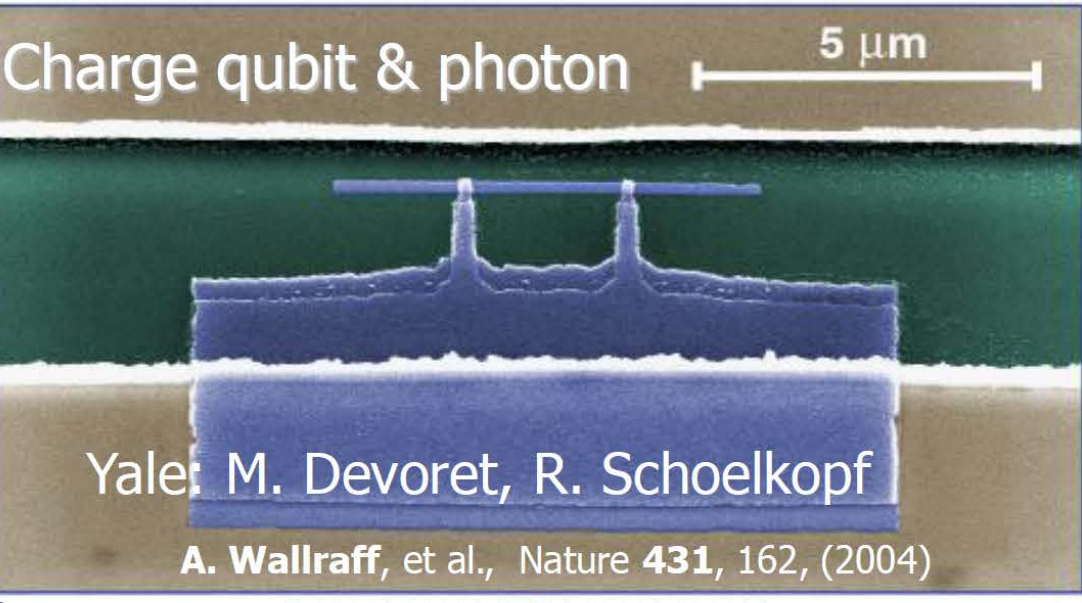
原子 → 超伝導人工原子を使う量子電磁力学へ (circuit QED)



Rydberg atom & photon high-Q cavity

ENS Paris: S. Haroche Max Planck, Caltech

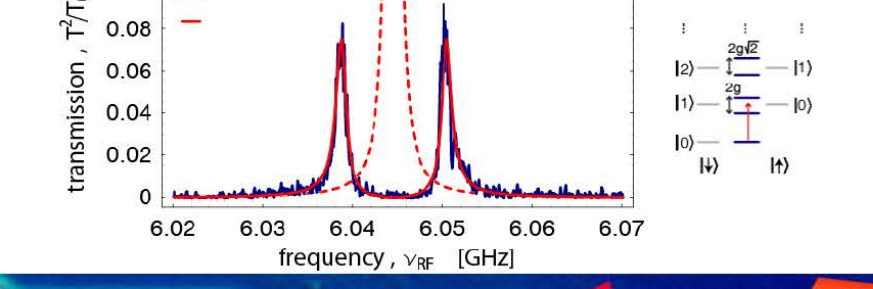
Ions & phonon



Charge qubit & photon 5 μm

Yale: M. Devoret, R. Schoelkopf

A. Wallraff, et al., Nature 431, 162, (2004)



M. Brune et al., Phys. Rev. Lett. 76, 1800 (1996).



SQUID & Flux qubit

Innsbruck : R. Blatt NIST Boulder : D. Wineland D. Leibfried, et al., Rev. Mod. Phys. 75, 281, (2003)

Delft : J. E. Mooij, C.J. P.M. Harmans I.Chiorescu, et al., Nature 431, 159, (2004)

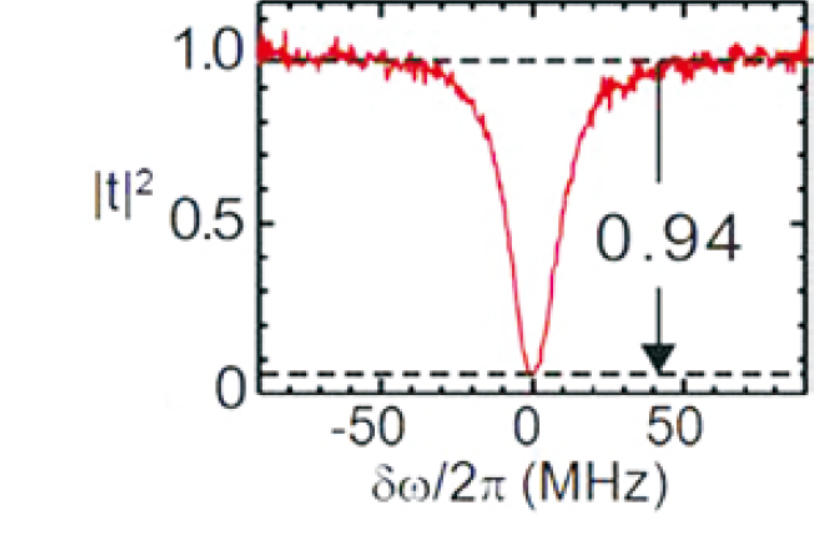


図1 超伝導人工原子を用いた新規量子光学デバイス

超伝導人工原子(磁束量子ビット(赤矢印))をコプレーン型導波路(金薄膜でできている黄色部分)中に設置しています。量子ビットである人工原子(赤矢印)はアルミニウム薄膜で構成されていて、超伝導ループにジョセフソン接合を4つ挿入しています。矢印での人工原子の自由度である超伝導ループを算(磁束)の状態を模式的に示しました。

図2 人工原子が示す巨視的量子数

共振周波数(実測周波数40MHz付近)で、入力のはた(94%)が反射することを観測しました。

O. Astafiev et al., Science 327, 840, (2010).

超伝導量子ビットの有望な量子メモリー候補を発見

論文情報 Xiaobo Zhu, Shiro Saito, Alexander Kemp, Kosuke Kakuyanagi, Shin-ichi Karimoto, Hayato Nakano, William J. Munro, Yasuhiro Tokura, Mark S. Everitt, Kae Nemoto, Makoto Kasu, Norikazu Mizuuchi, Kouichi Sema, "Coherent coupling of a superconducting flux qubit to an electron spin ensemble in diamond", Nature 478, 221-224 (2011). DOI: 10.1038/nature10462

関連URL <http://www.nature.com/nature/journal/v478/n7368/full/nature10462.html>

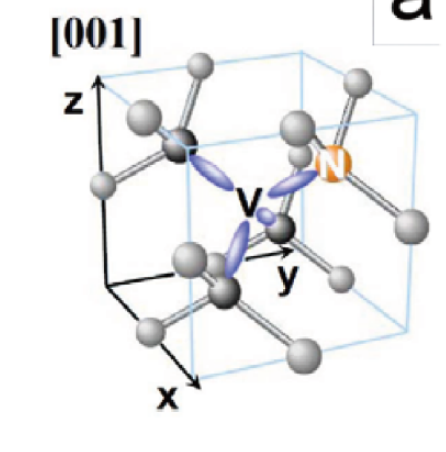
NTT 物性科学基礎研究所 仙場 浩一

NTT 物性科学基礎研究所 超伝導量子物理研究グループ (リーダー：仙場浩一) では、量子プロセッサ候補として期待されている超伝導磁束量子ビットの任意の量子状態を一時的に保存可能な「量子メモリー」の候補となる物理系を探してきましたが、このたび、図aに示すダイヤモンド中の窒素(N) 空孔(V) 複合欠陥中心 (NV センター) からなる電子スピン集団と超伝導磁束量子ビット系でコヒーレントな量子結合を観測することに世界で初めて成功しました。

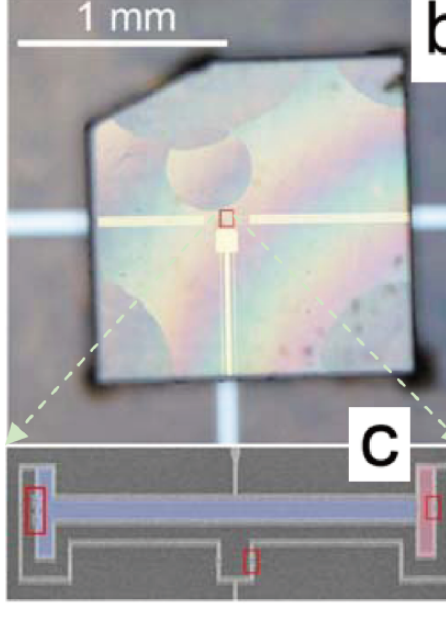
これは、超伝導量子ビットの重ね合わせ状態をダイヤモンド結晶中のスピン集団へ移した後に再び読み出せることを意味しており、量子通信や量子情報処理に不可欠な、量子メモリーの実現にとって、ダイヤモンドが極めて有望な候補であることを示すものです。

実験で用いた試料 (図b) では、トンネルバリア可変型超伝導磁束量子ビット (図c) と測定回路を覆うように高濃度 (10¹⁸cm⁻³) にNV センターを含むダイヤモンド単結晶が固定されています。系の基底状態近く 12mK で測定されたエネルギースペクトル (図d) には、電子スピン集団と超伝導磁束量子ビットとの強結合を示す 70 MHz に及ぶ明瞭な真空ラビ分裂が観測されました。この時、スピン集団は、どのNV センターがエネルギー量子を受け取ったかを測定されていないので、全ての可能な組み合わせの線形重ね合わせ (1励起ディック状態) である「スーパースピン」として振舞うと考えられます。

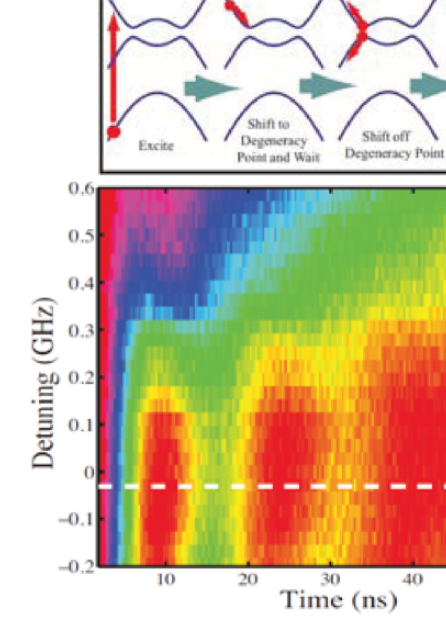
真空ラビ分裂の大きさから、およそ数千万個もの NV スピンがコヒーレントに参加していると考えられ、相互作用は1個のスピンと比較すると約 1 万倍にも増強されています。このようにスピン集団を使うと、短時間で



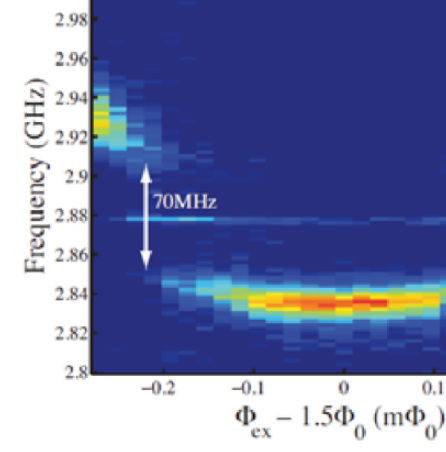
a



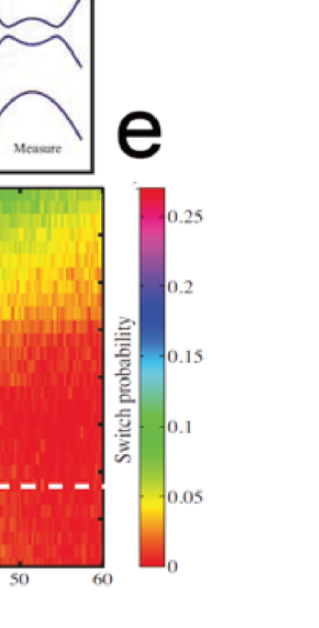
b



c



d



e

超伝導量子コンピュータサブグループ

量子計算実現に必須な技術の確立を目指す：～超伝導量子ビットを用いた「量子バス」および、新たな可能性を有する新提案に関する原理実証実験の実施～

● 蔡 兆 申 (理化学研究所)

○ 中村 泰 信 (東京大学 教授)

○ 高柳 英明 (東京理科大学 教授)

○ 仙場 浩一 (国立情報学研究所 教授)

○ 日高 睦 夫 (ISTEC 室長)

○ 前澤 正明 (AIST グループリーダー)